

## **SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE FACHADAS COMO CONTRIBUTO PARA ASSEGURAR OS nZEB – UM CASO DE ESTUDO EM PORTUGAL**



Ana MESTRE  
Investigadora  
Universidade do Minho, Guimarães



Muriel ITEN  
Investigadora  
Universidade do Minho, Guimarães



Manuela ALMEIDA  
Professora Associada  
Universidade do Minho, Guimarães

### **SUMÁRIO**

O sector dos edifícios é o maior consumidor de energia final na União Europeia. Isto deve-se ao facto de a maioria dos edifícios apresentar um fraco desempenho térmico da envolvente. O parque edificado da União Europeia é, na sua maioria, anterior a 1960, de uma época pautada pela ausência de regulamentos de eficiência energética e em que as questões relacionadas com o consumo de energia e as emissões de carbono não assumiam a importância que apresentam na atualidade. A reabilitação energética apresenta-se hoje como a ferramenta mais eficaz para fazer face ao desafio de melhorar o desempenho energético do parque edificado existente. Servirá não só para atingir as ambiciosas metas de redução de consumo energético até 2020 e 2050 como para garantir um ambiente construído de qualidade e sustentável. Com taxas de construção nova muito reduzidas, a reabilitação é uma solução alternativa que apresenta inúmeras vantagens e é cada vez mais reconhecida como o futuro no sector dos edifícios. A revisão da diretiva Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios introduziu o conceito de edifício de necessidades quase nulas de energia (nZEB) e a obrigatoriedade de todos os edifícios novos após 2020 serem nZEB. Da mesma forma, também o conceito deverá ser aplicado aos edifícios existentes, adaptando-os para nZEB, através da reabilitação energética. Estes edifícios apresentam um desempenho energético muito elevado, sendo que as

reduzidas necessidades energéticas que apresentam devem ser asseguradas em grande parte por energia proveniente de fontes renováveis, produzida no local ou nas proximidades. Complementarmente, as soluções nZEB devem obedecer a critérios de racionalidade económica. Para tal, a Comissão Europeia desenvolveu um quadro metodológico aplicável a todos os Estados Membros, que permite a identificação e análise dos níveis ótimos de rentabilidade do desempenho energético dos edifícios.

O presente estudo enquadra-se no âmbito do projeto Europeu *More-Connect* que se centra no desenvolvimento de elementos modulares prefabricados de reabilitação energética para atingir edifícios nZEB. É apresentada a análise preliminar de três cenários de reabilitação energética aplicados ao caso de estudo em Portugal e o desenvolvimento inicial de um elemento prefabricado de reabilitação de fachada.

## 1. INTRODUÇÃO

O sector dos edifícios é responsável pelo maior consumo de energia final e emissões de carbono na União Europeia (UE). Em termos de energia final, os edifícios representam 40% do total do consumo de energia final na UE. Relativamente às emissões de carbono, são responsáveis por cerca de 36% do total de emissões na União Europeia, na sua maioria provenientes da queima de combustíveis fósseis ao longo da sua fase de operação [1]. Os edifícios residenciais representam o maior segmento do parque edificado existente da UE e, consequentemente, são responsáveis pela maioria do consumo energético do sector. Em 2014, o consumo dos edifícios habitacionais foi cerca de 65% do consumo de energia final total de todo o sector [2]. A energia consumida no sector residencial relaciona-se sobretudo com o aquecimento e arrefecimento do espaço e com a produção de águas quentes sanitárias (AQS), cozinha e equipamentos elétricos. Destas, a aplicação que mais energia consome é o aquecimento do espaço.

O crescimento anual do sector dos edifícios na Europa é de apenas 1-3% [3], tendo registado, desde 2005, um abrandamento significativo devido à crise financeira no sector. Este contexto coloca os edifícios existentes no papel de maiores consumidores do sector. Para além disso, 40% dos edifícios existentes na Europa foram construídos antes de 1960, sendo que a legislação que obriga ao isolamento térmico da envolvente foi introduzida após 1970 na maioria dos países Europeus [4]. Ademais, apesar da vida estrutural de um edifício poder exceder 60 anos, a sua envolvente começa a mostrar sinais de obsolescência apenas 20 ou 30 anos após a sua construção. Consequentemente, o parque edificado precisa de uma intervenção urgente e é necessário promover a reabilitação energética rapidamente.

Quando comparada com a demolição de edifícios e consequente reconstrução, a reabilitação apresenta claras vantagens a nível social, ambiental e económico. O processo de construção de edifícios e a utilização de novos materiais apresentam um consumo intensivo de energia sendo que a construção de novos alojamentos requer de quatro a oito vezes mais recursos do que uma equivalente reabilitação [5]. Isto relaciona-se maioritariamente com o facto de os elementos estruturais de um edifício existente raramente necessitarem de ser substituídos. Com efeito, uma reabilitação evita a necessidade de novos materiais, ao mesmo tempo que apresenta um impacto ambiental reduzido face à demolição. Por melhor que seja a eficiência energética de um novo edifício a longo-prazo, será sempre insuficiente para compensar a energia despendida na sua construção. Para além disso, a demolição é um processo lento, dispendioso e impopular e deve portanto, ser considerado como último recurso [5].

A situação em Portugal é semelhante à Europeia, sendo caracterizada por um parque edificado bastante debilitado. De acordo com os dados apresentados em “Habitação em Portugal: evolução e tendências” [6], o número de edifícios construídos antes de 1970 representa cerca de 37% do total do parque edificado, sendo que essa situação se acentua significativamente em Lisboa e no Porto. Quase um terço dos edifícios habitacionais (cerca de um milhão de edifícios) necessita de intervenção, e que oscila desde pequenas reparações a reabilitações profundas. De acrescentar que os edifícios que apresentam pior estado de conservação são os anteriores a 1960 [6]. Adicionalmente, verifica-se que os alojamentos de residência secundária (ou de uso sazonal) e os alojamentos vagos representavam, em 2011, 19,3% e 12,5%,

respetivamente, o que traduz um aumento muito significativo face a 2001 [7]. À semelhança do que se observa por toda a Europa, também em Portugal não se observa uma melhoria significativa do desempenho energético do parque habitacional [8], uma vez que a maioria do edificado é anterior à implementação dos regulamentos térmicos, em que o primeiro (referente a edifícios residenciais) ocorreu em 1990, com entrada em vigor em Janeiro de 1991.

Através destes dados, é possível constatar que também o mercado português apresenta um potencial significativo para a reabilitação energética. Apesar do investimento no sector continuar a ser essencialmente dedicado à construção nova, a reabilitação tem vindo a ganhar um peso crescente no total de obras concluídas em Portugal. É imperativo que o mercado de reabilitação Português se desenvolva rapidamente pois se nenhuma intervenção for realizada nos edifícios anteriores a 1990, eles apresentarão uma contribuição superior a 80% nos consumos energéticos do sector, em 2050 [9].

No contexto atual, é reconhecido por um número crescente de intervenientes no sector, Governos e Instituições, que a reabilitação energética é o sector com maior potencial de evolução, quer a nível nacional quer a nível Europeu. Prova disso é que, ao longo das últimas décadas, tem-se vindo a assistir a um compromisso crescente no sentido de aumentar a eficiência energética dos edifícios. A curto-prazo, a União Europeia estabeleceu a “Estratégia 20-20-20”, cujo compromisso é o de aumentar a eficiência energética em 20%, diminuir as emissões de carbono em 20% até 2020 e aumentar em 20% a produção de energia renovável. Nesse âmbito, um dos sectores identificados como tendo o maior potencial para atingir esta poupança energética corresponde ao parque edificado existente. A longo-prazo, um objetivo ainda mais ambicioso foi estabelecido: diminuir os níveis de emissões de carbono entre 80 a 95% até 2050 (referentes aos níveis de emissões de 1990). Considerando que, o sector dos edifícios contribui com 36% das emissões de carbono, é evidente que um esforço para aumentar a eficiência energética dos edifícios se torna imperativo. A nível Europeu, a maior ferramenta legislativa relacionada com o consumo energético dos edifícios – Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) – foi primeiramente implementada em 2002 [10]. Inicialmente, a legislação recomendava a todos os Estados-Membros que definissem normas mínimas de desempenho energético para edifícios novos e edifícios alvo de grande renovação. No entanto, por lhe faltar alguma clareza e detalhe suficientes que permitissem uma implementação consistente em todos os Estados-Membros, a Diretiva foi atualizada em 2010 [11], sofrendo alterações relevantes e estabelecendo novos requisitos. A atualização da legislação não só reforçou os requisitos de desempenho energético dos novos edifícios e dos edifícios existentes, como também definiu objetivos ambiciosos no curto-prazo. Juntamente, foi introduzido um novo conceito, o do edifício de necessidades quase nulas de energia (nZEB), tornando-se obrigatório para novos edifícios licenciados a partir de 2020 e para edifícios públicos a partir de 2018. Apesar de não ter introduzido metas específicas a atingir para os edifícios existentes, exigiu aos Estados-Membros o desenvolvimento de estratégias e identificação de metas para aumentar o número de nZEBs resultantes de ações de reabilitação a edifícios existentes. Além disso, a atualização da legislação alargou o âmbito de aplicação dos requisitos de desempenho energético, passando a abranger atualmente a grande maioria das reabilitações. As alterações relativas aos edifícios existentes foram muito significativas porque o efeito da legislação aplicável a edifícios novos foi bastante dificultado pelo baixo volume de novas construções. Desta forma, as alterações traduziram-se num largo incentivo à reabilitação energética e que deverão, no futuro próximo, influenciar a extensão das ações de reabilitação e a sua frequência.

Neste artigo são apresentados estudos preliminares com vista à reabilitação de um edifício piloto em Portugal, no âmbito do projeto Europeu MORE-CONNECT – *Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for MODular RETrofitting and smart CONNECTions*. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas para reabilitar os elementos da envolvente de edifícios residenciais em sete países Europeus, representativos de cinco regiões climáticas da Europa. Assim, neste artigo apresenta-se um estudo prévio de três possíveis cenários de reabilitação bem como um estudo prévio de uma solução prefabricada de reabilitação de fachadas desenvolvida para o caso de estudo português.

## **2. REABILITAÇÃO ENERGÉTICA PARA ATINGIR nZEB**

A estratégia mais eficaz para atingir as metas traçadas de redução de energia e emissões de carbono nos edifícios é através da redução das necessidades energéticas e do uso de fontes de energia renovável com baixo ou nenhum teor de carbono [12]. A reabilitação energética oferece à União Europeia uma oportunidade de reduzir a dependência energética e liderar o caminho para atingir a sustentabilidade. Os impactos da reabilitação energética são extensos e vastos. Na esfera social apresenta-se como uma oportunidade de acabar com a pobreza energética, melhorar as condições de vida e de saúde e aumentar o conforto e a produtividade. Em termos de benefícios ambientais, a reabilitação reduz as emissões de carbono e outros poluentes da atmosfera (e.g. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) através da diminuição da utilização de combustíveis fósseis, contribuindo assim para mitigar o problema das alterações climáticas. Em termos energéticos contribui para aumentar a segurança do fornecimento de energia, evitar o aumento da capacidade de centrais de produção de energia e reduzir os picos de carga na rede elétrica. Reabilitar energeticamente o parque edificado contribui para estimular a economia através da criação de emprego e do aumento do rendimento disponível das famílias. Para além disso, contribuirá para aumentar o produto interno bruto da UE, apresentando um impacto positivo nas finanças públicas, beneficiará o valor da propriedade e estimulará a investigação e desenvolvimento neste sector [12]. A lista de benefícios é extensa e afirma, uma vez mais, a importância da reabilitação do parque edificado.

A reabilitação energética tem por objetivo reduzir o consumo de energia do edifício e reduzir as emissões de carbono associadas à sua operação ao longo de todo o seu ciclo de vida, tornando-o num edifício de baixo impacto ambiental. Para atingir estes resultados, a estratégia consiste em minimizar as necessidades energéticas do edifício através da melhoria térmica da envolvente, do aumento da eficiência dos sistemas de produção ou distribuição de energia e da substituição parcial ou total das fontes energéticas fósseis por fontes renováveis. Sempre que possível, as necessidades energéticas restantes do edifício devem ser satisfeitas através de produção local de energia renovável. Além disso, a arquitetura do edifício deve seguir princípios bioclimáticos e a implementação de sistemas de armazenamento de energia deve ser considerada. No entanto, a qualidade da envolvente é um dos fatores que mais influencia o desempenho térmico do edifício, especialmente na fase de operação. O aumento do isolamento térmico dos elementos da envolvente (paredes exteriores, pavimentos, coberturas e vãos envidraçados) é uma medida que reforça termicamente a envolvente do edifício. Geralmente, o isolamento pelo exterior apresenta várias vantagens face ao isolamento pelo interior, nomeadamente a proteção das paredes exteriores dos agentes atmosféricos, a preservação da inércia térmica do edifício e a não redução da área útil do espaço interior. Contribui também para a melhoria da estética do edifício, reduz o risco de condensações e é mais eficiente na resolução das pontes térmicas. A par de soluções convencionais como a adição de isolamento nos elementos da envolvente, têm vindo a ser desenvolvidas e aplicadas soluções modulares prefabricadas com o mesmo fim. A prefabricação é um processo de fabrico e de montagem, o qual geralmente ocorre em instalações especializadas, onde vários materiais são utilizados e combinados com vista a conceber um componente final [13]. A aplicação desta tecnologia no desenvolvimento de novas soluções de reabilitação apresenta um potencial significativo em termos económicos, ambientais, energéticos e de materiais. Soluções fabricadas em linhas de montagem industriais são potencialmente mais acessíveis pois o processo é facilmente replicável e a aquisição de matérias-primas é maior resultando em menores custos e maior economia de escala. A simplificação do processo de montagem de soluções prefabricadas reduz substancialmente o tempo de aplicação no edifício o que, por sua vez, produz o mínimo de perturbação aos moradores e reduz de forma significativa os resíduos de construção. Por outro lado, a prefabricação de soluções de reabilitação garante um maior controlo de qualidade [14]. No entanto, soluções que aplicam tecnologias de prefabricação no sector de reabilitação de edifícios não se encontram disseminadas no mercado Português. Neste momento, torna-se fundamental o desenvolvimento do mercado que, em certa medida, poderá ser feito através de projetos de investigação, como é exemplo o projeto em que o presente estudo se insere.

### **Edifícios com necessidades de energia quase nulas (nZEB)**

A reformulação da EPBD em 2010 introduziu os conceitos de edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB) e de nível ótimo de rentabilidade [11]. A diretiva foi transposta para a lei nacional o que obrigou à revisão da legislação existente e à consequente publicação de um novo decreto de lei, o DL nº 118/2013 [15]. Este Decreto estabeleceu uma definição para os edifícios nZEB - edifícios com necessidades de energia quase nulas, com elevado desempenho energético e para os quais a satisfação das necessidades de energia seja em grande parte proveniente de fontes renováveis, produzidas no local ou nas proximidades [15]. Através do mesmo Decreto, foram também estabelecidos os requisitos mínimos de desempenho energético global, dos sistemas técnicos e elementos construtivos, tanto para os edifícios novos, como para os edifícios sujeitos a reabilitação. No entanto, a legislação Portuguesa ainda não definiu indicadores numéricos específicos para as necessidades de energia primária ou de emissões de carbono associados ao nível nZEB.

O elevado desempenho energético do edifício é garantido através da eficiência da envolvente, que terá de ser compatível com os níveis de viabilidade económica resultantes da aplicação da metodologia do custo ótimo e da utilização de fontes de energia renovável que devem existir no próprio edifício ou na parcela de terreno onde o mesmo foi erigido. A análise dos níveis ótimos de rentabilidade permite fazer uma otimização da relação custo/benefício de um determinado investimento face à melhoria do desempenho energético do edifício que é possível atingir com essa medida. Os limites mínimos para o desempenho de um edifício estão estabelecidos na legislação e referem-se a cada elemento do edifício (fachadas, coberturas, pavimentos e envidraçados) e aos equipamentos utilizados para o aquecimento, arrefecimento e AQS. Além do mais, esses equipamentos devem utilizar energia renovável, mantendo os níveis de rentabilidade ótima. A Comissão Europeia estabeleceu uma metodologia comum a todos os Estados Membros para a determinação dos níveis de rentabilidade ótima que se traduzem por ser os níveis de desempenho energético que conduzem ao mais baixo custo ao longo do ciclo de vida do edifício [16]. Esta metodologia baseia-se na avaliação e comparação de diversas soluções de reabilitação para um determinado edifício com base no consumo de energia primária e no custo global ao longo do período de vida útil do edifício [17]. Os custos globais devem incluir os custos de investimento inicial, custos de substituição de equipamentos e custos de funcionamento (energia, manutenção e operação) ao longo do ciclo de vida. A metodologia aconselha a desenvolver a análise para um período de vida útil de 30 anos [16]. O custo ao longo do ciclo de vida é calculado utilizando o método do valor atual líquido, descontando os custos e benefícios futuros para o período de vida útil. De forma a analisar o custo-benefício de medidas de reabilitação energética é necessário definir um cenário de reabilitação de referência. Este cenário permite comparar os impactos energéticos, ambientais e económicos no edifício depois da reabilitação com os impactos no cenário de referência. Esse cenário corresponde a uma solução que considera apenas medidas de manutenção necessárias para manter a integridade do edifício mas que não conduzem a qualquer melhoria do desempenho energético do edifício.

A Figura 1 apresenta os resultados genéricos da aplicação da metodologia de custo ótimo. A cada ponto geral apresentado no gráfico corresponde uma determinada solução de reabilitação. Assim, para cada ponto é possível identificar a energia primária de origem não renovável associada ao custo global para um período de 30 anos.

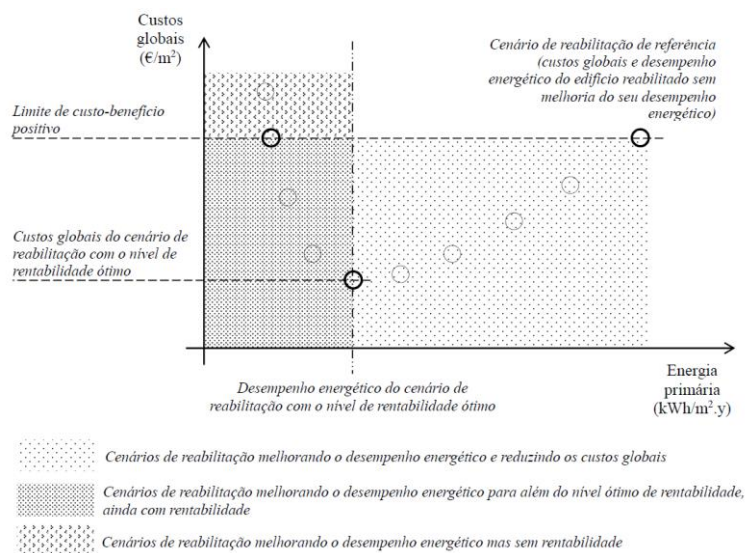


Figura 1: Resultados da aplicação da metodologia de custo ótimo [17].

O ponto mais à direita da curva refere-se ao cenário de referência. Os restantes correspondem a soluções analisadas e que são alvo de comparação com a solução de referência. Todas as soluções que apresentarem um custo global superior ao custo da solução de referência não são considerados rentáveis e todos aqueles que apresentarem um custo inferior são considerados com rentabilidade positiva. Assim, o ponto mais baixo da curva corresponde à solução com nível ótimo de rentabilidade. Todas as soluções que se encontrem abaixo do limite de custo-benefício positivo e para a esquerda do ponto com o nível de rentabilidade ótimo, em direção ao zero, são soluções rentáveis. No entanto, não podem necessariamente ser consideradas soluções nZEB, uma vez que estas dependem do contributo das renováveis. Contudo, esse contributo não poder ser analisado diretamente a partir do gráfico apresentado, este é analisado através da metodologia e insere-se nos cálculos subjacentes à mesma. Uma vez que a legislação Portuguesa não estabeleceu ainda limites para as necessidades de energia primária ou de emissões de carbono para um edifício nZEB, existe uma gama de soluções possíveis que se encontram nessa área do gráfico. A metodologia de custo ótimo é utilizada no âmbito deste estudo como a ferramenta que permite a otimização energética e económica das soluções prefabricadas.

### 3. CASO DE ESTUDO

A reabilitação do edifício em estudo encontra-se inserida no âmbito do projeto Europeu *More-Connect*. Um dos objetivos do projeto consiste no desenvolvimento de soluções de reabilitação que apresentem nível de rentabilidade ótima para atingir edifícios nZEB e que representem uma redução de consumo de energia primária de, pelo menos, 80% face à situação atual do edifício. A reabilitação energética dos edifícios piloto do projeto será feita através de elementos modulares prefabricados com requisitos específicos tais que permitam atingir os objetivos de melhoria de desempenho energético. Para além disso, o projeto pretende que a utilização de elementos prefabricados permita reduzir o volume de trabalho no local a menos de 10% face a uma reabilitação tradicional, e que o tempo total das obras de reabilitação não seja superior a 5 dias. O retorno do investimento para o utilizador final deverá ser menor do que 8 anos. Neste estudo é apresentada a análise do atual desempenho energético do edifício e a simulação de três possíveis cenários de reabilitação energética (seção 3.1). Os cenários têm por base os diferentes objetivos do projeto de melhoria de desempenho térmico do edifício e são analisados com base nos requisitos nacionais em vigor: i) redução de 80% no consumo de energia primária do edifício face à situação atual ii) solução nZEB e iii) balanço de energia zero

(NZEB). A análise foi desenvolvida com base na metodologia de custo ótimo, tendo por objetivo a otimização do desempenho térmico da envolvente do edifício e considerando a integração de energias renováveis.

Na Seção 3.2 é apresentado o primeiro protótipo de um elemento modular prefabricado para reabilitação da fachada do caso de estudo Português. Ademais, o ensaio experimental de quatro elementos modulares é descrito e os resultados do comportamento térmico são apresentados.

O edifício em estudo é um edifício multifamiliar, parte de um complexo de habitação social localizado no Município de Vila Nova de Gaia. Apresenta uma área total de 1414 m<sup>2</sup> e foi construído em 1997. O edifício é formado por três blocos adjacentes, cada um deles com três pisos e dois apartamentos por piso (1 T2 e 1 T3 por piso). No total, o edifício é composto por dezoito apartamentos. A Figura 2 apresenta a fachada principal do edifício e a Figura 3 a planta do edifício com a respetiva orientação.



Figura 2: Alçado principal do edifício em estudo.

← N

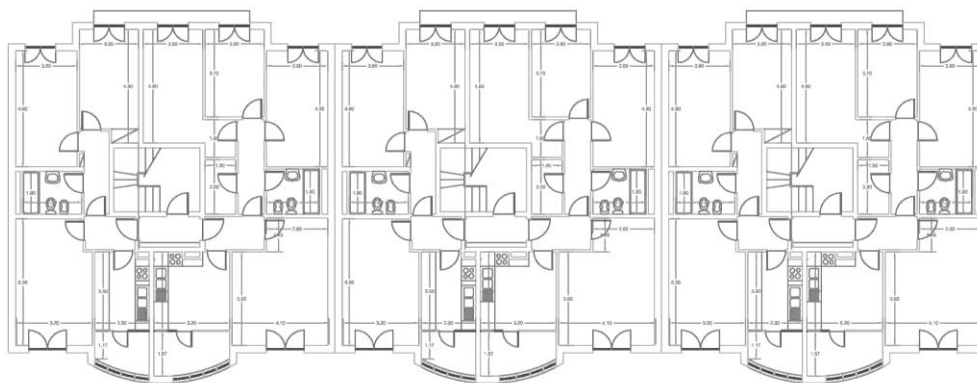


Figura 3: Planta geral do edifício em estudo.

O edifício tem a fachada principal orientada a oeste. Tem cobertura inclinada com telha cerâmica e 3 cm de isolamento aplicado sobre a laje de esteira (laje aligeirada de 25 cm), paredes exteriores duplas de alvenaria cerâmica sem isolamento térmico, pavimento em laje aligeirada de 25 cm e envidraçados com vidro duplo sem corte térmico e caixilharia de alumínio. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente do edifício.



Tabela 1 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente do edifício.

Elemento da envolvente	Coeficiente de transmissão térmica (W/m <sup>2</sup> .K)
Paredes exteriores	0.96
Cobertura	0.91
Pavimento	0.78
Vãos envidraçados	3.60

Não existe sistema centralizado de aquecimento e arrefecimento do espaço sendo que cada apartamento apresenta radiadores individuais portáteis para aquecimento do espaço e um esquentador a gás propano para o aquecimento de águas sanitárias.

As necessidades totais de energia primária do edifício são 174 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

### 3.1. Estudo de possíveis cenários de reabilitação

Foram realizados estudos preliminares para três possíveis cenários de reabilitação energética, tendo por base a metodologia de custo ótimo. A análise que aqui se apresenta consistiu num estudo prévio muito simplificado que permitiu apenas analisar, numa primeira fase, a viabilidade técnica, ambiental e económica da reabilitação do edifício em estudo bem como da viabilidade de cumprimento dos ambiciosos objetivos do projeto em que o mesmo se insere. Para tal, foram identificadas algumas medidas de reabilitação capazes de reduzir as perdas de calor durante o inverno, evitar ganhos de calor excessivos no verão e aumentar a eficiência dos sistemas de aquecimento e arrefecimento. Nesse sentido, foram analisadas diferentes espessuras de isolamento para os elementos da envolvente bem como outro tipo de envidraçados e diferentes tipos de sistemas de aquecimento, arrefecimento e AQS. O estudo analisou apenas um apartamento, situado por baixo da cobertura, por ser o que apresenta as maiores necessidades energéticas e por ser aquele que apresenta a situação mais desfavorável de todo o edifício. Dessa forma, foi analisada a colocação de diferentes níveis de isolamento nas paredes exteriores e na cobertura, sendo que medidas de isolamento do pavimento não foram consideradas. Para além disso foram considerados novos envidraçados e diferentes sistemas para cobrir as necessidades de aquecimento e arrefecimento do espaço e produção de AQS. Com base nessas medidas foram estabelecidos diferentes pacotes de medidas de reabilitação. O cálculo do desempenho térmico do edifício foi realizado de acordo com o Regulamento Português para o desempenho energético dos edifícios de habitação (REH). Foi calculado o desempenho energético do edifício para cada um dos pacotes de renovação em termos de necessidades de energia primária não renovável. O custo global (custos de investimento, manutenção e operação) para um período de 30 anos foi calculado para cada um dos pacotes de renovação. As necessidades de energia primária não renovável e o custo global para cada pacote de medidas foi analisado e comparado com um cenário base de referência que inclui apenas medidas de manutenção que não melhoram o desempenho energético do edifício. Na Tabela 2 são apresentadas as características do nível ótimo de rentabilidade para a envolvente do edifício e para cada sistema de aquecimento, arrefecimento e AQS. Como se pode verificar, e corroborando os resultados já obtidos em outros estudos [18], a solução de custo ótimo da envolvente é a mesma, quaisquer que sejam os sistemas utilizados. A eficiência dos sistemas utilizados influencia maioritariamente o custo global da solução e as necessidades de energia primária não-renovável. A Tabela 3 apresenta as necessidades de energia primária não-renovável e o custo global associado às diferentes soluções de reabilitação. Na Tabela 4 são apresentados os valores do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente para a situação atual e para cada cenário de reabilitação.



Tabela 2 – Características da solução de custo ótimo para a envolvente do edifício e para diferentes sistemas de aquecimento, arrefecimento e AQS.

Solução	Sistemas	Paredes exteriores	Cobertura	Janelas
1	Ar condicionado; Esquentador a gás	EPS* 60 mm	RW** 80 mm	Caixilharia PVC*** U= 2.7 W/m <sup>2</sup> .K; g=0.75
2	Ar condicionado; caldeira a biomassa	EPS 60 mm	RW 80 mm	Caixilharia PVC U= 2.7 W/m <sup>2</sup> .K; g=0.75
3	Ar condicionado; caldeira a gás	EPS 60 mm	RW 80 mm	Caixilharia PVC U= 2.7 W/m <sup>2</sup> .K; g=0.75
4	Bomba de calor	EPS 60 mm	RW 80 mm	Caixilharia PVC U= 2.7 W/m <sup>2</sup> .K; g=0.75
5	Ar condicionado; solar térmico; termoacumulador	EPS 60 mm	RW 80 mm	Caixilharia PVC U= 2.7 W/m <sup>2</sup> .K; g=0.75

\* Poliestireno expandido

\*\* Lã de rocha

\*\*\*Policloreto de vinila

Os resultados preliminares apresentados permitem concluir que é possível atingir uma solução nZEB (solução nº1 nas Tabelas 2, 3 e 4) para o edifício em estudo através do isolamento da envolvente exterior com 60 mm de poliestireno expandido, 80 mm de lã de rocha aplicado no desvão da cobertura (30mm iniciais mais 50 mm adicionados na reabilitação) e janelas com vidros duplos e caixilharia em PVC. Esta solução inclui um ar condicionado para suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento e um esquentador a gás para suprir as necessidades de AQS. Esta é a solução de menor custo associada aos níveis de rentabilidade ótima da envolvente, solução nZEB de acordo com a atual legislação, e apresenta necessidades de energia primária não-renovável de 66 kWh/m<sup>2</sup>.ano e um custo global de 459 €/m<sup>2</sup> (Tabela 3).

Tabela 3 - Necessidades de energia primária não-renovável, redução das necessidades e custo global de cada solução simulada para o caso de estudo em Portugal.

	Energia primária não-renovável kWh/m <sup>2</sup> .ano	Redução das necessidades face à situação atual %	Custo global €/m <sup>2</sup>
Solução 1	66	73	459
Solução 2	08	97	577
Solução 3	78	68	544
Solução 4	56	77	754
Solução 5	44	81	553

A solução nº2 é a que apresenta a redução mais significativa nas necessidades de energia primária do edifício (97%) o que se deve ao uso da biomassa enquanto fonte de energia renovável. Apresenta um custo global de 577 €/m<sup>2</sup>. A solução nº 4 tem o custo global mais elevado (754 €/m<sup>2</sup>) por utilizar uma bomba de calor para aquecimento, arrefecimento e AQS, cujo investimento inicial é muito elevado quando comparado com o dos outros sistemas. As soluções nº3 e nº5 apresentam um custo global semelhante, 544 e 553 €/m<sup>2</sup>, respetivamente. No entanto, a solução nº5 que integra um sistema solar térmico e um termoacumulador, tem uma redução das necessidades de energia primária 13% superior à solução nº4 que utiliza uma caldeira a gás. Os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente (Tabela 4) são iguais para todas as soluções de custo ótimo e traduzem uma redução muito significativa face à situação atual do edifício.

Tabela 4 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente para a situação atual e para os cinco cenários de reabilitação.

Solução	Coeficiente de transmissão térmica (W/m <sup>2</sup> .K)			
	Paredes exteriores	Cobertura	Janelas	Pavimento
Atual	0.96	0.91	3.6	0.78
Solução 1	0.38	0.39	2.7	0.78
Solução 2	0.38	0.39	2.7	0.78
Solução 3	0.38	0.39	2.7	0.78
Solução 4	0.38	0.39	2.7	0.78
Solução 5	0.38	0.39	2.7	0.78

Os resultados destas simulações preliminares permitiram concluir que não é complexo chegar aos níveis de qualidade exigidos pelo projeto. Dos resultados obtidos é possível concluir que o cenário nZEB, que apresenta uma redução de energia primária não-renovável de 73%, está muito próximo do cenário i) imposto no projeto *More-Connect* correspondente a uma redução de 80% das necessidades de energia primária. Para atingir o cenário ZEB (cenário iii)) seria necessário satisfazer as necessidades energéticas remanescentes do cenário nZEB com a produção local de energia renovável, o que poderá ser conseguido sem grande esforço com a colocação de painéis fotovoltaicos. Em suma, os resultados apresentados identificam as soluções de nível ótimo de rentabilidade do edifício em estudo e mostram que é possível reduzir significativamente e com alguma facilidade as necessidades energéticas do edifício (reduções da ordem dos 80%) bem como chegar ao nível de energia zero, cumprindo, assim, com os objetivos do projeto.

### 3.2 Estudo do protótipo prefabricado de reabilitação de fachadas

Um dos objetivos do projeto em que o presente estudo se insere é o desenvolvimento de elementos prefabricados para a reabilitação de edifícios em direção a edifícios nZEB. A prefabricação é uma solução vantajosa face às soluções de reabilitação convencionais por ser facilmente replicável, simplificar o processo de montagem e o tempo de aplicação no edifício, garantir um maior controlo de qualidade e reduzir custos. O potencial energético, ambiental e económico de soluções prefabricadas permitiria colmatar as limitações atuais do sector da construção Europeu em desenvolver uma abordagem sistemática que garanta a reabilitação energética, estrutural e de larga escala dos edifícios existentes. Neste sentido, o projeto *More-Connect* centra-se no desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas que atuem como elemento central em reabilitações energéticas para atingir edifícios nZEB.

No âmbito do projeto, a UMinho em conjunto com duas empresas também envolvidas no projeto, desenvolveu, produziu e testou experimentalmente o primeiro protótipo prefabricado para reabilitar as fachadas do edifício piloto Português. Uma primeira versão da constituição do painel é apresentada na Figura 4 (corte transversal). O painel consiste num perfil de madeira revestido exteriormente por coretech, sendo o interior preenchido com espuma de poliuretano. O coretech é um material composto por materiais reciclados provenientes da indústria automóvel (papel kraft e celulósico, tecido, espuma de PU semirrígida, fibra de vidro longa) e ligantes com base fenol (resina termo estável fenólica) responsável por agregar todos os elementos. A densidade do painel é de 19,7 kg/m<sup>3</sup> e tem 12 cm de espessura. Este material apresenta vantagens a nível da resistência ao fogo e à humidade, e a sua baixa densidade torna-o um material de estrutura leve e de fácil aplicação. Complementarmente, o coretech permite a aplicação de qualquer tipo de revestimento exterior (reboco, ladrilho, pintura, etc.).

Os painéis prefabricados serão posteriormente aplicados na fachada do edifício, pelo exterior, sendo fixados à parede existente. De forma a melhorar a sua ligação à parede bem como o comportamento térmico da solução prefabricada, foi considerada e analisada a colocação de uma manta de lã de rocha entre a parede exterior e o painel prefabricado. Para além de diminuir o efeito das pontes térmicas, a manta de lã de rocha irá também absorver as irregularidades da parede existente e permitir uma ligação uniforme do painel à parede.

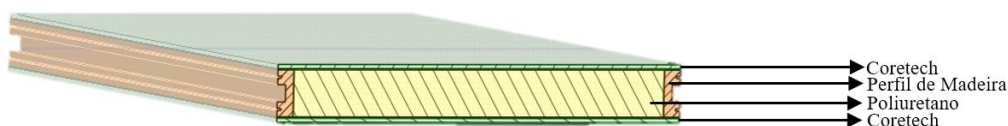


Figura 4: Corte transversal do painel com indicação dos materiais constituintes.

Quatro painéis foram instalados numa câmara térmica e testados para análise do seu desempenho térmico. Foram colocados 5 fluxímetros para medir o fluxo de calor através do painel e respetivas juntas de ligação entre painéis (Figura 5) bem como diversos termopares ao longo das suas duas faces para medir as temperaturas superficiais. Os ensaios decorreram em maio de 2016, durante um período de duas semanas, sendo os dados recolhidos por um datalogger a cada 5 minutos. A figura 5 apresenta uma fotografia da instalação experimental e um esquema com a localização dos fluxímetros.

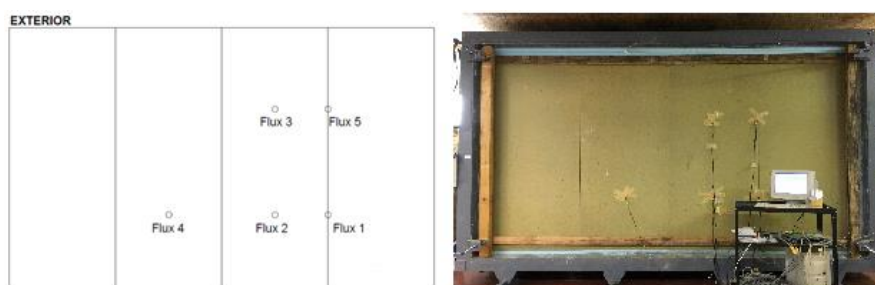


Figura 5: Instalação experimental de teste do protótipo - distribuição dos fluxímetros ao longo dos painéis.

Através do ensaio foi possível analisar o comportamento térmico do painel na zona de ligação entre painéis e na zona corrente dos mesmos. A Figura 6 apresenta, a título de exemplo, os fluxos de calor ( $\text{W/m}^2$ ) registados pelos fluxímetros afixados em cada uma das zonas, ao longo das 24 horas do dia 7 de Maio.

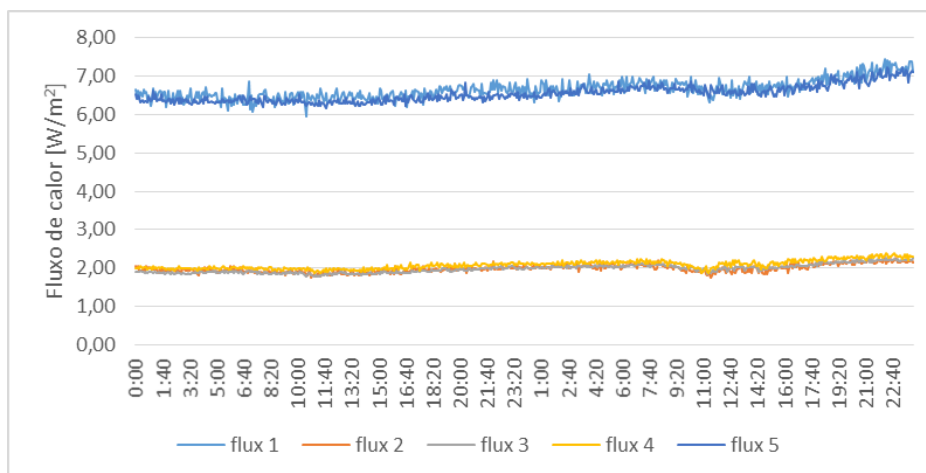


Figura 6: Fluxo de calor registado através dos fluxímetros no painel.

É possível observar através do gráfico que ao longo da junta dos painéis (fluxímetros 1 e 5) se regista um fluxo de calor substancialmente mais elevado do que na zona corrente dos painéis (fluxímetros 2, 3 e 4). Esta diferença deve-se à existência de pontes térmicas na ligação entre os painéis e que resultam em perdas térmicas superiores às da zona corrente do painel. A

Tabela 5 apresenta os valores do coeficiente de transmissão térmica na zona corrente e na zona da ligação, obtidos experimentalmente e onde se pode observar a mesma disparidade de valores que existe em relação aos fluxos de calor medidos, evidenciado a presença de pontes térmicas significativas.

Tabela 5 - Coeficiente de transmissão térmica na zona corrente e zona da junta do protótipo testado obtidos experimentalmente.

Zona do painel	Coeficiente de transmissão térmica $W/m^2.K$
Corrente	0.26
Junta	0.96

De forma a minimizar as pontes térmicas torna-se necessário otimizar a ligação entre painéis, reforçando o nível de isolamento na zona. A aplicação de uma manta de lã de rocha entre o painel e a parede existente apresenta-se como uma solução vantajosa para melhorar o comportamento térmico do protótipo. Contribui para estabelecer um isolamento contínuo que diminui de forma significativa as perdas térmicas quer na zona corrente quer na zona da junta. Para além disso, a lã de rocha é facilmente compressível contra a parede existente, permitindo uma fácil aplicação e a continuidade da ligação do painel à parede existente absorvendo as irregularidades da mesma e evitando o aparecimento de novas pontes térmicas.

Posteriormente procedeu-se à realização de uma série de simulações numéricas para testar o comportamento térmico do painel em conjunto com uma manta de lã de rocha não revestida. Foram testados quatro tipos de lã de rocha não revestida (MN40, MN50, MN70, MN230) e várias espessuras para cada uma delas. Os resultados preliminares do coeficiente de transmissão térmica da zona da junta e na zona corrente do painel para diferentes espessuras de cada uma das lãs de rocha são apresentados na Tabela 6.

Para cada densidade de lã de rocha foi identificada a espessura ótima a aplicar através da análise da diferença entre os valores obtidos, para identificar os aumentos significativos para cada espessura. Observou-se que para ambas as zonas do painel, para a lã de rocha de 40 kg/m<sup>3</sup> a espessura ótima a aplicar é de 100 mm e para as restantes lãs de rocha a espessura ótima é de 80 mm.

Tabela 6 - Coeficientes de transmissão térmica na zona da junta e na zona corrente do painel para várias espessuras de diferentes lãs de rocha

Tipo de lã de rocha	Espessura (mm)	Coeficiente de transmissão térmica na zona da junta ( $W/m^2.K$ )	Coeficiente de transmissão térmica na zona da corrente ( $W/m^2.K$ )
Solução inicial do painel	-	0.96	0.26
MN40	60	0.52	0.19
	70	0.49	0.18
	80	0.47	0.17
	100	0.42	0.16
MN50	60	0.52	0.19
	80	0.46	0.17
	100	0.42	0.16
MN70	60	0.51	0.18
	80	0.46	0.17
	100	0.41	0.16
MN230	60	0.53	0.19
	80	0.47	0.17
	100	0.43	0.16

Foi ainda feita uma análise de custos preliminar da qual se pôde concluir que a variedade de lâ de rocha MN230 (25/30 kg/m<sup>3</sup>) é aquela que apresenta os menores custos. Dessa análise decorre que a espessura de lâ de rocha MN230 de 100 mm é a que apresenta o maior potencial de aplicação, face à de 80 mm, pois permite obter melhores coeficientes de transmissão térmica com um incremento de custo de 23%. Para além disso, esta solução também é a que oferece o menor valor de U, o que é vantajoso pois permite assegurar o melhor desempenho térmico do painel. Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes de transmissão térmica do painel associado com 100 mm de lâ de rocha, obtidos por simulação numérica.

Tabela 7 - Coeficiente de transmissão térmica do painel com 100 mm de lâ de rocha na zona da junta e zona corrente.

Zona do painel	Coeficiente de transmissão térmica W/m <sup>2</sup> .K
Corrente	0.16
Junta	0.43

A distribuição de temperaturas no painel com esta solução pode ser observada na Figura 7, que apresenta um corte transversal do mesmo e que permite observar uma constância das temperaturas superficiais nas duas faces do painel permitindo concluir que as pontes térmicas na zona da junta foram substancialmente reduzidas.

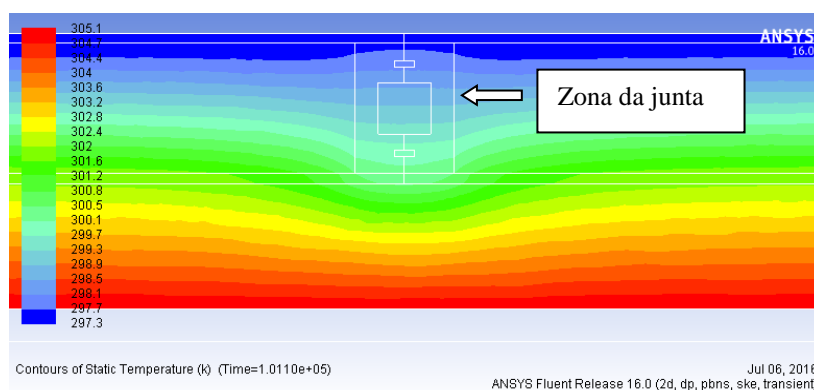


Figura 7: Simulação da distribuição de temperaturas no painel utilizando 100 mm de lâ de rocha (corte transversal).

Com base nestes resultados, foram também calculadas as necessidades de energia primária do edifício em estudo, com a aplicação do painel prefabricado associado a uma manta de lâ de rocha com 100 mm de espessura. Com a aplicação apenas do painel na fachada do edifício, as necessidades totais de energia primária do edifício corresponderiam a 141 kWh/m<sup>2</sup>.ano, o que representa uma redução de 19% face ao desempenho térmico atual do edifício. Os cenários de reabilitação apresentados anteriormente (seção 3.1) conduziam a reduções mais significativas pelo fato de incluírem medidas de reabilitação não só para a fachada mas também para outros elementos da envolvente como a cobertura e os envidraçados.

#### 4. CONCLUSÕES

A reabilitação energética apresenta inúmeras vantagens a nível social, ambiental, energético e económico. Apresenta-se como uma ferramenta eficaz para reduzir o consumo energético no sector dos edifícios, transformando os edifícios existentes em edifícios com necessidades energéticas reduzidas e ainda, eventualmente, com capacidade de produção de energia.

O presente estudo está a ser desenvolvido no âmbito do projeto europeu *More-Connect*. Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de elementos modulares prefabricados para reabilitação de edifícios residenciais em direção aos edifícios nZEB. Neste artigo são

apresentados o estudo inicial de três possíveis cenários de reabilitação, o protótipo preliminar de um painel prefabricado em desenvolvimento na UMinho e o ensaio experimental do mesmo de modo a determinar as suas características e a otimizar o seu desempenho aquando da sua aplicação no edifício em estudo em Portugal. São ainda apresentadas as simulações numéricas de várias soluções que associam ao painel uma manta de lã de rocha não revestida, analisando o seu impacto no desempenho térmico do edifício. O estudo dos possíveis cenários de reabilitação consistiu numa análise prévia em que foi analisado um conjunto limitado de medidas de reabilitação e onde foram identificadas as potenciais soluções de nível ótimo de rentabilidade. A solução nZEB (cenário ii) pode ser atingida com a aplicação de 60 mm de poliestireno expandido nas paredes exteriores, 80 mm de lã de rocha na cobertura, janelas com vidro duplo e um sistema de ar condicionado para suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento e um esquentador a gás para AQS. As necessidades de energia primária não-renovável desta solução correspondem a 66 kWh/m<sup>2</sup>.ano e a solução teria um custo global de 459 €/m<sup>2</sup>. Esta solução corresponde aproximadamente ao cenário i), com uma redução no consumo atual de 73%. Uma solução para atingir o cenário iii) (ZEB) seria instalar um sistema solar fotovoltaico que satisfizesse as necessidades energéticas remanescentes calculadas para o cenário nZEB (66 kWh/m<sup>2</sup>.ano), de modo a que as necessidades de energia primária não-renovável fossem reduzidas a zero. Estes resultados permitem observar que é possível atingir melhorias muito significativas no desempenho energético do edifício através de soluções de reabilitação rentáveis e que cumprem os objetivos do projeto *More-Connect*.

O estudo do protótipo de painel para reabilitação de fachada mostrou perdas térmicas significativas na zona de ligação entre os painéis. Através de simulação numérica foi possível comprovar que ao adicionar uma manta de lã de rocha ao atual protótipo, ao colocar entre ele e a parede existente, as pontes térmicas são reduzidas de forma significativa. O comportamento térmico da nova solução de painel melhora consideravelmente, apresentando coeficientes de transmissão térmica muito reduzidos. O protótipo apresenta ainda características vantajosas a nível ambiental e energético, cumprindo os objetivos do projeto no âmbito do qual está a ser desenvolvido. A constituição do painel é resistente à humidade e ao fogo, é leve e de fácil aplicação e a utilização de materiais reciclados contribui na otimização do ciclo de vida dos materiais incorporados. O painel continua a ser alvo de estudo no sentido de otimizar o seu desempenho, o que resultará no desenvolvimento de uma versão otimizada, associada à incorporação de uma manta de lã de rocha, a ser testado e comparado com os valores obtidos através de simulação. O estudo prévio dos cenários de reabilitação que aqui foi apresentado vai ser desenvolvido e irá incluir a versão melhorada do painel prefabricado, o que conduzirá a uma análise posterior mais profunda e abrangente.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo projeto Europeu H2020-EE-2014-2015/H2020-EE-2014-1-PPP, grant agreement nº 633477, “MORE-CONNECT – Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for Modular Retrofitting and smart CONNECTIONs”.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Buildings Performance Institute Europe – “Europe’s buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings” (ISBN No. 9789491143014). Belgium. 2011.
- [2] Eurostat 2015. Disponível em <http://ec.europa.eu/eurostat>
- [3] Ma, Z., Cooper, P., Daly, D. & Ledo, L. – “Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art” *Energy and Buildings*, 55, 889-902, 2012.
- [4] Konstantinou, T., Knaack, U – “An approach to integrate energy efficiency upgrade into refurbishment design process, applied in two case-study buildings in Northern European climate” *Energy and Buildings*, 59, 301-309, 2013.

- [5] Power, A. - "Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?" *Energy Policy*, 36, 4487–4501, 2008.
- [6] Pedro, J. - "Habitação em Portugal: evolução e tendências". 2013. Lisboa: INE & LNEC.
- [7] Instituto Nacional de Estatística & Laboratório Nacional de Engenharia Civil - "O parque habitacional e a sua reabilitação – Análise e evolução 2001-2011". Lisboa: Instituto Nacional de Estatística. 2013.
- [8] Costa, R., Bragança, L., Mateus, R., & Bezerra, J. - "Reabilitação sustentável de edifícios antigos – Contribuição para os edifícios de balanço energético nulo (nZEB) e otimização do nível de sustentabilidade". Universidade do Minho, 2014.
- [9] Schwehr, P., Fischer, R., & Geier, S. - "Retrofit strategies design guide - Advanced retrofit strategies & 10 steps to a prefab module" (ISBN No. 978-3-905594-59-1). IEA Programme for Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 50. 2011.
- [10] Parlamento Europeu e Conselho do Parlamento Europeu – "Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios". *Jornal Oficial da União Europeia*, L001, 65-71.
- [11] Parlamento Europeu e Conselho do Parlamento Europeu – "Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)". *Jornal Oficial da União Europeia*, L153/13.
- [12] Buildings Performance Institute Europe – "A guide to developing strategies for building energy renovation" (ISBN No. 9789491143076). Belgium. 2013.
- [13] Winch, G. - "Models of manufacturing and the construction process: the genesis of reengineering construction" *Building Research & Information*, 31, 107-118, 2013.
- [14] Silva, P. - "A integração de soluções inovadoras em edifícios com vista à reabilitação energética". Tese de doutoramento. Universidade do Minho. 2013.
- [15] Regulamento do desempenho energético dos edifícios de habitação – Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto. 2013.
- [16] Comissão Europeia – "Regulamento delegado (UE) Nº 244/2012 da Comissão de 16 de Janeiro de 2012" *Jornal Oficial da União Europeia*, L81, 18-36, 2012.
- [17] Almeida, M., Ferreira, M., & Rodrigues, A. - "Soluções otimizadas de reabilitação de edifícios residenciais para atingir os nZEB" *Seminário de Paredes de Alvenaria*, 103-122, Lisboa, 2015.
- [18] Marco Ferreira, Manuela Almeida, Ana Rodrigues and Sandra Monteiro Silva, "Comparing cost optimal and net-zero energy targets in building renovation". *Building Research & Information Journal*, Volume 44, 2016, Issue 2.